

# Navigazione e sistemi satellitari

## Introduzione

La misura del tempo e lo sviluppo della navigazione si intrecciano nel corso della storia; la costruzione di orologi più accurati si può infatti collegare alla necessità di sviluppare strumenti per la determinazione della longitudine, indispensabile per l'esplorazione del globo che ha caratterizzato il XV e il XVI secolo.

Ancora all'inizio del XVIII secolo erano ben individuate ed utilizzate solo tre o quattro rotte oceaniche, e molto spesso le navi che si discostavano da queste rotte andavano perdute. Questo era provocato dagli insufficienti metodi di orientamento in mare, oltre che dal fatto che la topografia delle coste e delle isole riportate sui cosiddetti portolani era ancora incerta.

Il problema stava nella determinazione delle coordinate geografiche di un luogo, cioè la latitudine o elevazione angolare al di sopra o al di sotto del piano equatoriale, e la longitudine o differenza angolare del meridiano del luogo rispetto ad un meridiano di riferimento.

Mentre la latitudine veniva misurata con sufficiente approssimazione osservando, ad esempio, di notte la stella polare e di giorno il sole al passaggio sul meridiano del luogo misurandone l'elevazione, la determinazione della longitudine



presentava più difficoltà perché il solo mezzo di cui disponeva il marinaio era l'osservazione delle congiunzioni di astri (eclissi solari o lunari), utilizzando ancora una tecnica proposta in epoca ellenistica da Ipparco, che si basava sul principio che la differenza di longitudine tra due località è pari alla differenza tra le ore locali in cui si osserva un fenomeno astronomico il quale, a sua volta, deve essere temporalmente ben definito per una determinata località.

Mentre la determinazione della latitudine era fattibile senza grandi difficoltà, quella della longitudine era alquanto difficoltosa a causa dello scarso numero di eclissi visibili nell'arco dell'anno e della difficoltà di valutarne l'istante di inizio e fine, per non parlare della precisione degli orologi utilizzati.

Si comprende quindi come la disponibilità di orologi accurati a bordo sia fondamentale per la conoscenza della propria posizione.

## Il Sistema GPS

A partire dal secolo scorso, i problemi esposti prima sono stati risolti su aree sempre più estese, fino a raggiungere attualmente una scala mondiale, dallo sviluppo delle telecomunicazioni e della realizzazione di servizi di radiotrasmissione di segnali di tempo campione in gamme di frequenze diverse.

A partire dagli anni ottanta, è stato disponibile un primo sistema realmente globale di radionavigazione, il GPS (Global Positioning System) realizzato dagli Stati Uniti, basato su una costellazione di satelliti artificiali, seguito da uno con caratteristiche analoghe realizzato dall'Unione Sovietica, il GLONASS (Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema).

Il GPS ed il GLONASS sono sistemi composti da una rete di satelliti in orbita terrestre. Sono nati per esigenze di carattere militare, sotto il controllo dei rispettivi ministeri della Difesa, e solo in un secondo momento sono state possibili applicazioni di tipo civile. L'utilizzo del GPS, in particolare, si è esteso ad un ritmo impressionante grazie alla disponibilità sul mercato di una gamma di prodotti, adatti a soddisfare la maggior parte delle attuali esigenze nel campo della navigazione e delle sincronizzazione.

Il vantaggio di questi sistemi di radionavigazione, basati su misure di distanza tra la posizione nota di alcuni satelliti e l'antenna ricevente dell'utilizzatore, è di consentire anche la determinazione accurata dello scarto di tempo tra l'orologio del ricevitore locale e la scala di tempo del satellite, riferita a sua volta alla scala di tempo di riferimento del sistema, che viene mantenuta in stretto accordo con la scala di tempo internazionale UTC (Universal Time Coordinated). Questi dispositivi rappresentano quindi anche un sistema globale di disseminazione in tempo reale della data e dell'unità di intervallo di tempo, ad un livello d'incertezza di alcune decine di nanosecondi.

Sviluppati per scopi militari, gli attuali sistemi di radionavigazione interessano un mercato in maggioranza di tipo civile, con una presenza capillare in settori eterogenei che spaziano dalla ricerca scientifica alla sicurezza, dalle telecomunicazioni alle attività del tempo libero, interessando sempre nuovi segmenti dell'attività umana, grazie anche alla continua riduzione dei prezzi e delle dimensioni dei dispositivi utilizzati.

Il GPS, sviluppato negli anni settanta dal dipartimento della difesa degli Stati Uniti, è un sistema di radio localizzazione tridimensionale a copertura globale, disponibile con continuità e sotto ogni condizione atmosferica, utilizzabile anche da veicoli in rapido movimento come gli aerei; rappresenta l'evoluzione di un sistema preesistente, il TRANSIT, il quale si basava su satelliti in orbita polare defilante e su misure di "doppler" di frequenza.

Esso è costituito da *tre segmenti principali*: quello spaziale cioè i satelliti veri e propri, il segmento di controllo cioè le stazioni di monitoraggio poste a terra ed il segmento utente, costituito questo dagli utilizzatori del servizio che possono essere in numero illimitato in quanto operano in modo passivo, si limitano cioè alla sola ricezione di radiosegnali.

Il *segmento spaziale*, schematizzato in figura, è costituito da una costellazione di 24 satelliti equamente distribuiti su 6 orbite inclinate di  $55^\circ$  sull'equatore, a bassa eccentricità ed equispaziate, con i satelliti posti ad un'altezza di circa 20000 km dalla superficie terrestre, che compiono due rotazioni complete in un giorno siderale (circa  $23^h$  e  $56^m$ ).

A bordo di ogni satellite si trovano due orologi atomici al cesio e due al rubidio sincronizzati con la scala di tempo GPS, realizzata a terra dall'USNO (United States Naval Observatory) e mantenuta in accordo entro qualche decina di nanosecondi con la scala di tempo universale coordinato UTC. I satelliti, oltre a ricevere dalle stazioni di terra i



segnali di aggiornamento e di controllo, trasmettono segnali di riferimento per le misure di distanza ed i parametri della propria orbita su due portanti a radiofrequenza, utilizzando la tecnica CDMA (Code Domain Multiple Access). Le frequenze utilizzate vengono indicate con L1 (1575,42 MHz) ed L2 (1227,60 MHz); la prima è modulata con un segnale di 10,23 MHz detto "Precision Code" (P-code) e con uno di 1,023 MHz indicato come "Coarse Acquisition Code" (C/A-code), la seconda è modulata con il solo codice P. Le modulazioni, basate su codici binari quasi aleatori PN (Pseudo Noise), costituiscono un riferimento temporale e sono caratteristici di ogni satellite; il codice C/A è il solo accessibile agli utenti civili poiché il codice P è criptato ed accessibile ai soli utenti privilegiati. Le due portanti sono poi modulate con una sequenza di dati che costituisce il messaggio di navigazione, contenente le informazioni necessarie all'utente per conoscere la posizione del satellite, il suo stato operativo, le correzioni da apportare alle misure per compensare i ritardi di propagazione e lo scarto tra la scala di tempo di bordo e quella GPS.

Il *segmento di controllo* è costituito da cinque stazioni di terra poste a grande distanza ed adibite al controllo operativo dell'intero sistema; le coordinate delle loro antenne riceventi sono note con accuratezza e le scale di tempo sincronizzate con il tempo GPS. Una di queste, indicata come "master", coordina l'attività delle altre che effettuano automaticamente misure di distanza da ogni satellite e ne riceve i dati di misura; l'elaborazione di questi ultimi consente di affinare la conoscenza dei parametri orbitali e le correzioni degli orologi di bordo di ogni satellite. Tali parametri vengono poi trasmessi almeno una volta al giorno ai rispettivi satelliti da alcune stazioni di terra distribuite attorno al globo.



Il *segmento utente* è costituito dai sistemi riceventi dell'utilizzatore; ognuno di questi esegue misure di distanza da almeno tre satelliti contemporaneamente o in rapida successione, compie pertanto delle trilaterazioni.



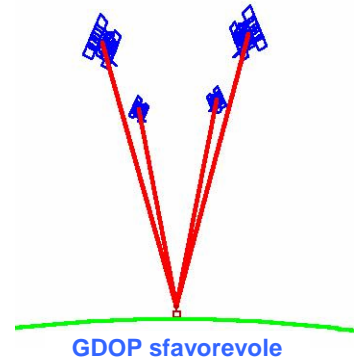
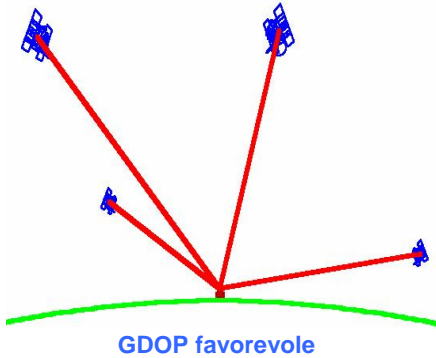
La ricezione dei segnali modulati con codice PN consiste nel generare localmente una replica del codice caratteristico del satellite, variandone gradualmente la fase mediante un sistema di controllo fino ad ottenere la massima correlazione con quello ricevuto. La presenza sulla stessa portante dei codici degli altri satelliti, che sono scorrelati, viene vista come rumore ed ignorata.

A correlazione avvenuta, lo scarto di fase del riferimento temporale del codice rispetto all'orologio locale rappresenta, a meno della velocità di propagazione della luce (nel vuoto circa 300 000 km/s) e di ritardi troposferici, ionosferici e relativistici aggiuntivi, la distanza del satellite dal ricevitore.

Questa in effetti è una pseudodistanza (pseudorange), poiché in generale lo scarto di tempo tra l'orologio di terra e quello del satellite non è noto. Disponendo allora di misure di pseudodistanza da almeno quattro satelliti e utilizzandone i messaggi di navigazione che contengono anche i parametri orbitali, si può impostare un sistema di quattro equazioni che consente di determinare le coordinate dell'antenna ricevente nel sistema di riferimento terrestre

WGS84, oltre allo scarto dell'orologio locale rispetto a quello del satellite oppure rispetto al tempo GPS. Nel caso di mezzi in movimento è anche possibile determinare i vettori di velocità ed accelerazione mediante misure "Doppler".

Un problema comune al GPS e agli altri sistemi di localizzazione, è la possibilità che in determinate condizioni la posizione dei satelliti utilizzati, che è in continua evoluzione, assuma una geometria sfavorevole rispetto all'utilizzatore; quando i satelliti, ad esempio, si presentano concentrati in una certa zona dell'emisfero, consentono misure con un'incertezza superiore rispetto a quando invece sono equamente spaziatati. Questo fatto viene caratterizzato da un parametro che è funzione delle reciproche posizioni, il GDOP (Geometric Dilution of Precision), che quantifica la bontà della configurazione utilizzata e consente al ricevitore di ottimizzare la scelta dei satelliti.

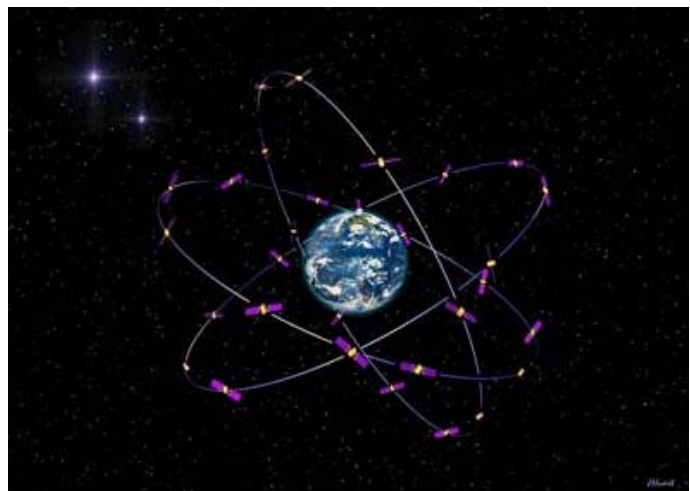


Gli orologi dei satelliti GPS si trovano in condizioni di moto e di potenziale gravitazionale molto diverse rispetto a quelli terrestri dove viene realizzata la scala di tempo GPS, e questo richiede che per loro vengano applicate le correzioni previste allo scopo dalla teoria della relatività. A titolo di esempio un orologio al cesio posto su un satellite GPS, essendo sottoposto ad un minor potenziale gravitazionale (circa il 6% di quello terrestre) aumenta la sua frequenza e tale aumento viene solo parzialmente compensato dall'effetto della diversa velocità del satellite (circa 12 volte quella terrestre). Come risultato l'orologio in volo anticiperebbe di alcune decine di microsecondi al giorno, anticipo che viene preventivamente compensato impostandogli, al momento del lancio, un'opportuna correzione e tenendolo poi strettamente sotto controllo mediante il segmento di terra ed applicandogli ulteriori correzioni nella sua fase operativa. *Per ulteriori dettagli, si veda la sezione "Orologi atomici e teoria della relatività".*

### Sviluppi per un sistema di navigazione integrato GNSS (Global Navigation Satellite System)

Una delle maggiori preoccupazioni degli utenti dei sistemi di radionavigazione attualmente disponibili, è la loro affidabilità e vulnerabilità. Infatti, nel recente passato, si è avuto notizia di molti casi di interruzione o malfunzionamento del servizio, originati da cause diverse che includono interferenze non intenzionali, guasti dei satelliti, inibizione o degradazione dei segnali trasmessi.

A livello mondiale, ed in ambito europeo in particolare, avendo riconosciuto l'importanza strategica della navigazione satellitare e delle sue applicazioni potenziali, nel corso degli anni novanta è stato deciso di sviluppare sistemi di navigazione complementari di differenti livelli, denominati GNSS 1 e GNSS 2. Nel contesto europeo, questi sistemi sono noti come EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) e Galileo.



EGNOS che è un sistema civile di supporto al GPS, consiste in un servizio di sorveglianza e di segnalazione di eventuali malfunzionamenti (integrità) della costellazione GPS stessa. La disponibilità di un tale sistema che certifica la qualità dei segnali, è essenziale per la sicurezza in applicazioni critiche, come ad esempio nel campo dell'aviazione civile. Il sistema EGNOS, mediante la fornitura di correzioni di tipo differenziale, riduce le limitazioni caratteristiche dei sistemi GPS e GLONASS considerati separatamente. È previsto che il sistema EGNOS sia operativo al partire dal 2005. Iniziative analoghe a quella europea sono state sviluppate per il continente americano con il sistema WAAS, e per l'area del Giappone con quello MSAS.



Il sistema Galileo invece rappresenta un passo ben più importante per la radionavigazione. Infatti, l'introduzione di sistemi di navigazione su larga scala, non possono essere accettati se gli utilizzatori sono completamente dipendenti da un singolo fornitore del servizio, e ancora di meno se questo è al di fuori del controllo e del contesto europeo; Galileo rappresenta quindi anche un obiettivo di autonomia da parte dell'Europa. Inoltre, accanto ad un servizio analogo e complementare al GPS ma sotto il controllo civile, Galileo vuole offrire anche dei servizi atti a migliorarne le prestazioni nel campo delle applicazioni critiche, della sicurezza e per applicazioni commerciali. È previsto che Galileo sia completamente *compatibile ed interoperativo*, a livello dell'utilizzatore, con gli altri sistemi GNSS, riducendo notevolmente la probabilità che si verifichino anomalie comuni ai diversi sistemi. L'uso combinato di GALILEO ed altri sistemi GNSS, offrirà migliori prestazioni, su base globale, per tutti i tipi di utenti e per ogni genere di applicazione.

Il programma Galileo prevede una costellazione di 30 satelliti, distribuiti su tre orbite circolari, poste ad un'altezza di circa 24 000 km, garantendo una copertura globale di tutta la superficie terrestre. Il sistema avrà come supporto una robusta rete terrestre di controllo, distribuita sul globo e coordinata a livello europeo.

Galileo offrirà diversi livelli di prestazioni e servizi:

- *livello base*, con accesso gratuito, pensato per applicazioni "consumer" e di interesse generale;
- *livello ad alte prestazioni*, adatto ad applicazioni dove è fondamentale la sicurezza del funzionamento, come ad esempio per la sicurezza dei passeggeri;
- *livello ad accesso ristretto*, per applicazioni commerciali e professionali in grado di produrre servizi a valore aggiunto, o per applicazioni particolari dove la sicurezza richiesta è ancora superiore e coinvolge la sicurezza nazionale.